エタノールの混合がバイオディーゼル燃料の 噴霧，着火および燃焼特性に及ぼす影響*

井上 泰宏^{*1} 松浦 貴^{*1} 千田 二郎^{*2}

Effect of Biodiesel Fuel Mixed with Ethanol on Spray, Ignition and Combustion Characteristics

By Yasuhiro INOUE, Takashi MATSUURA and Jiro SENDA

Biodiesel fuel (BDF) is a renewable resource, and is a promising carbon neutral fuel. However, BDF has the properties of high viscosity and poor volatility. Therefore, the atomization of its spray seems to be inhibited, which results in problems such as severe engine deposits and injector coking. In this study, BDF is mixed with a low boiling fuel to improve its fuel properties. Ethanol was chosen as the fuel to be mixed with BDF because of its higher oxygen content, lower ignitability and higher volatility. The ethanol addition would exert a large influence on mixture formation, ignition, combustion, and exhaust emissions. In the experiments, the spray characteristics were measured by shadowgraph photography and Mie-scattered light photography, while the mixture concentration and ignitability were measured by chemiluminescence photography. The experimental results show that the liquid phase penetration decreased with increasing of the mixture ratio of ethanol to BDF, and the ignition timing and ignition position can be controlled by changing the mixture ratio of BDF and ethanol.

1. 緒論

バイオディーゼル燃料(BDF)は再生可能な資源であり，カーボンニュートラルな燃料として期待されている⁽¹⁾．しかし，BDFの性状は軽油に比べ高動粘度・低揮発性であるため，燃料噴霧の微粒化が抑制され噴霧特性が悪化する⁽²⁾．そのため，実機に適用した際には燃焼不全により堆積物の生成を招き，機関の不具合および出力低下といった問題を引き起こす⁽³⁾．そこで当研究室ではBDFの軽質化を図るため，千田らの提案する燃料設計手法⁽⁴⁾に基づき，炭化水素系燃料であるノルマルヘプタンやイソオクタンを混合し噴霧，燃焼，ならびに排気特性に関する研究を行ってきた⁽⁵⁻⁷⁾．本研究では混合燃料においてもカーボンニュートラルな特性を維持するため，植物から製造可能なエタノールを混合することで高効率かつ低エミッションな燃料の設計を図る．

BDFとエタノールは沸点および動粘度だけでなく，セタン価，酸素含有率といった種々の物性値が大幅に異なる．そのため，両者を混合することでこれらの諸因子が混合気形成，着火，燃焼および排気特性に及ぼ

す影響を調査する．

本報では，BDFに混合するエタノールの割合を変化させることで噴霧，混合気形成ならびに着火特性に及ぼす影響を調査する．これを模擬するため，定容燃焼容器を用いてシャドウグラフ・Mie散乱光の同時撮影により噴霧の巨視的な構造を把握し，自発光撮影により化学種生成挙動ならびに着火時期・位置を把握する．

2. 供試燃料

2. 1 燃料設計手法 本手法は燃料設計手法の概念を沸点の大幅に異なるBDFとエタノールに応用したものである．図1に沸点が異なる単一成分およびそれらを混合した際の相変化過程を圧力-温度線図上で示す．混合燃料の場合は，混合した単一成分の飽和蒸気圧曲線が互いに引き寄せ合い，双方の成分の気液が混在する二相領域が形成される．二相領域は，高沸点成分の飽和蒸気圧曲線より低温・高圧側に形成されることから，混合燃料の蒸発性は高沸点成分のそれに比べて優れているといえる．また，双方の成分の混合割合を変化させることで，任意の蒸発性を有する燃料を作成することが可能である．本研究では高沸点成分としてBDF，低沸点成分としてエタノールを用い，BDFの物性値の改善を図る．

*原稿受付 平成22年10月06日．

*1 同志社大学大学院（京都府京田辺市多々羅都谷1-3）．

*2 正会員 同志社大学（京都府京田辺市多々羅都谷1-3）．

2. 2 供試燃料の組成および性状 表1に供試燃料の組成およびそれらの性状を示す。本実験に用いたBDFは廃食油をメチルエステル化したものであり、主成分としてパルミチン酸メチル(C16:0)、ステアリン酸メチル(C18:0)、オレイン酸メチル(C18:1)が含まれる。エタノールは試薬用のエタノールを用いてバイオエタノールを模擬した。供試燃料としてBDFとエタノール(Ethanol)を体積割合で100:0(B100)、80:20(B80:E20)、60:40(B60:E40)および40:60(B40:E60)で混合したものをを用いた。なお、リファレンス燃料としてJIS1号軽油を使用した。表1よりBDF(B100)は軽油に比べ、着火性は同等の値を示すが低揮発性・高動粘度であることから重質な性状を示すことが確認できる。一方、エタノール(E100)はBDFに比べ、着火性が劣るものの、蒸発性・動粘度共に優れ、酸素含有割合が非常に大きい。これらの性状を示すBDFとエタノールを混合することにより、混合燃料の物性値は双方の間の値を示す。以上のことから、BDFとエタノールを混合割合を変化させることで、燃料性状を人為的に制御することが可能となる。

3. 実験内容

3. 1 実験装置および方法

3. 1. 1 定容燃焼容器 図2に本実験に用いた

Fig.1 Schematic of phase change process in mixed fuel on pressure-temperature diagram

Table 1 Properties of test fuels

B;BDF, E;Ethanol	B100	B80:E20	B60:E40	B40:E60	E100	Gas oil (JIS No.1)
Mixing ratio (Volume ratio) BDF:Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	100:0	80:20	60:40	40:60	0:100	—
Density (288K) [g/m ³]	886	868	849	830	790	822
Kinetic viscosity (313K) [mm ² /s]	4.590	3.130	2.214	1.638	1.373	2.852 ^{*1}
10% distillation ratio (T10) [K]	624	350	352	352	351	460
50% distillation ratio (T50) [K]	625	608	606	352	351	614
90% distillation ratio (T90) [K]	630	622	616	613	351	614
Cetane index [-]	60.4	-	-	-	8	55.0
Lower calorific value [MJ/kg]	42.31	39.21	36.11	33.02	26.82	43.09
Pour point [K]	270	269	268	266	159 ^{*2}	263
Oxygen content [mass%]	11.0	15.8	20.5	25.3	34.8	0

^{*1} 303K ^{*2} Freezing point

定容燃焼容器の概略図を示す。本容器の燃焼室容積は約1000ccであり、容器側面に取り付けた直径80mmの石英窓より燃焼室内を可視化する。また、インジェクタを設置した容器上面の蓋の形状を変化させることで目的に応じた噴霧火炎領域を観察することが可能である。

3. 1. 2 実験手順 図3に本実験システムの概略図を示す。これらは大別すると、定容燃焼容器、可燃混合気を作成する混合容器、燃料噴射装置および周辺装置によって構成される。周辺装置としては、パルスタイミング制御装置およびデータ処理装置等がある。本実験では、混合容器にてアセチレン、酸素および窒素から成る可燃ガスを作成し、その混合気を定容燃焼容器内に充填する。そして、スパークプラグにより火花点火することで、燃焼室内を高温・高圧の状態にする。その後、壁面への熱損失により次第に燃焼室内の圧力・温度が降下する。この圧力・温度降下過程において目的の圧力・温度に到達した際に、燃料をノズルより単発噴射することでディーゼル機関の上死点近傍に相当する噴霧燃焼場を模擬する。燃料噴射装置には電子制御式コモンレールシステム(DENSO: ECD-U2 システム)を用いた。また、容器内の圧力履歴はピエゾ式圧力センサ(KISTLER: 6125B)を用いて測定し、その信号をチャージアンプ(KISTLER: type6011)を介してCPUに取り込む。

Fig.2 Schematic cross-section diagram of constant volume combustion vessel

Fig.3 Schematic diagram of experimental setup

3. 2 光学系

3. 2. 1 シャドウ・Mie 散乱光の同時撮影 エタノールの混合割合の変化が BDF の噴霧構造に及ぼす影響を調査するため、シャドウグラフ・Mie 散乱光の同時撮影を行った。図 4 にその光学系の概略図を示す。光源には Ar+レーザー(Spectra physics : Model2017, 波長; $\lambda=488\text{nm}$)を用いた。光源からの光は、ピンホールにて点光源とされた後、片凹レンズ(焦点距離; $f=40\text{mm}$)および両凸レンズ($f=800\text{mm}$)を介して約 $\phi 80\text{mm}$ の平行光とされ、容器内へ照射される。平行光は容器内を通過し、シュリーレンミラー($f=1500\text{mm}$)によって集光され、ハイスピードビデオカメラ (Photoron; Fastcam APX RS) へ導かれる。カメラの撮影速度は 15000f.p.s , 1 フレーム当たりの露光時間は $1\mu\text{s}$ である。また、最適な輝度値の撮影画像を得るために、カメラレンズの前方に ND フィルタ(10%透過率)を設置した。一方、噴霧液滴群からの散乱光を撮影するため、平行光と直角の位置に CCD カメラ(浜松ホトニクス : C4742-95-10NR)を設置した。このカメラの露光時間は $50\mu\text{s}$, 撮影時期は燃料噴射終了時とした。

3. 2. 2 自発光撮影 エタノールの混合に伴う BDF の混合気形態の変化が化学種生成挙動・着火特性に及ぼす影響を調査するため、自発光撮影を行い、低温酸化反応過程を把握するため HCHO, 着火位置を把握するため OH を撮影した。図 5 にその光学系の概略図を示す。本実験では、2 種類のバンドパスフィルタ

Fig.4 Schematic diagram of optical setup for shadowgraph and Mie-scattered light photography

Fig.5 Schematic of optical setup for chemiluminescence photography

(OH : 中心波長 306nm 半値幅 8.98nm , HCHO : 中心波長 400nm 半値幅 10.01nm)を U.V.レンズ(Nikon : U.V. Nikkor 105mm)前面に装着した。その後、イメージインテンシファイア(浜松ホトニクス : C10880-03F)により発光強度を増幅させ、リレーレンズを介しハイスピードカメラ(Photoron : FASTCAM APX RS)にて撮影を行った。なお、カメラの撮影速度は 15000f.p.s , イメージインテンシファイアの露光時間は $40\mu\text{s}$ とした。

3. 3 実験条件 表 2 に実験条件を示す。雰囲気温度が噴霧・着火燃焼特性に及ぼす影響を調査するため、燃料噴射開始時のそれを 800K , 900K , 1000K と設定した。また、雰囲気気密度を 16.2kg/m^3 , 雰囲気酸素濃度を噴霧実験では 0% , 燃焼実験では 21% とした。燃料噴射差圧は 70MPa とし、全ての燃料で噴射量が 20mg 一定となるように噴射期間(t_{inj})を設定した。なお、初期燃料温度は 293K に保った。

4. 実験結果および考察

4. 1 エタノールの混合割合の変化が噴霧特性に及ぼす影響

4. 1. 1 シャドウグラフ画像 図 6 に雰囲気温度 900K における各燃料のシャドウグラフ画像を示す。各燃料は噴射された後、噴霧軸半径方向へと拡がりながら下流へと移行する。その後、液相部と思われる(影の濃い)領域と、気液が混在していると思われる(影の薄い)領域が現れる。影の薄い部分は噴霧液滴の微粒化が進行し、噴霧が希薄化している状態である。特に、噴霧下流域ではそれが顕著に現れる。B100 では影の濃い領域が広範囲で観察されるが、エタノールの混合割合が最も多い B40:E60 では微粒化および蒸気化が促進されるため、その領域が狭くなる。

4. 1. 2 先端到達距離および噴霧角 図 7, 8 に雰囲気温度 900K における各燃料の噴霧先端到達距離の時系列変化、噴霧角の平均値とエタノールの混合割合の関係をそれぞれ示す。噴霧角の平均値には噴射開始後 0.1ms から 1.2ms における噴霧角を用いた。なお、噴霧角 $\theta_{\max}$ は次式から算出した。

Table 2 Experimental conditions

	Spray	Combustion
Ambient temperature at injection T_a [K]	800, 900, 1000	
Ambient density ρ_a [kg/m^3]	16.2	
O_2 concentration X_{O_2} [%]	0	21
Injection pressure drop Δp_{inj} [MPa]	70	
Injection quantity [mg]	20	
Fuel temperature [K]	293	
Injection equipment	Common-rail type	
Injection nozzle configuration	$d_n=0.20[\text{mm}]$, $L_n/d_n=4$	

$$\theta_{\max} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{W_{\max} / 2}{L} \right)$$

ここで、 $W_{\max}$ は各画像において噴霧軸半径方向の最大拡がり幅、 L は $W_{\max}$ となるノズルから噴霧軸方向までの距離を表す。

噴霧先端到達距離、噴霧角の平均値はいずれも各燃料間に顕著な差が現れない。これは、BDFとエタノールの物性値の差では蒸気相に影響を及ぼさなかったためと考えられる。

4. 1. 3 液相部長さ 図9に Mie 散乱光撮影によって得られた液相部長さとエタノールの混合割合の関係を示す。各雰囲気温度において、エタノールの混合割合の増加に伴い液相部長さは減少傾向を示す。これは低沸点成分であるエタノールの混合により、BDF

Fig.6 Spray images taken by shadowgraph photography ($T_a=900\text{K}$)

Fig.7 Time history of spray tip penetration ($T_a=900\text{K}$)

の動粘度および蒸発性が改善され噴霧の希薄化が促進されたため、液相部長さが減少したと考えられる。一方、各雰囲気温度における燃料間の液相部長さの差を比較すると、高温雰囲気場 1000K においてそれが最も小さくなる。この結果より、雰囲気温度が高くなることで燃料の物性値の差異が液相部長さに及ぼす影響は小さくなるといえる。

4. 2 エタノールの混合割合の変化が着火時期に及ぼす影響 図 10 に着火遅れ期間とエタノールの混合割合の関係を示す。なお、着火遅れ期間は燃料噴射開始時から熱発生率が負から正に転じるまでの期間とした。 $T_a=900\text{K}$ ではエタノールの増加に伴い、混合割合に対して線形関係を示さないものの着火遅れ期間は長期化した。千田らの研究⁽⁸⁾によれば混合燃料の着火性は高自着火成分に大きく依存し、混合割合に関わらず高自着火成分単体とほぼ同等の着火性を示すとの知見がある。本実験の結果はこれと明らかに異なる挙動を示しており、エタノール混合により着火を遅延させる効果を示唆している。エタノールは炭化水素系燃料

Fig.8 Averaged spray angle (0.1-1.2ms) ($T_a=900\text{K}$)

	B100	B80:E20	B60:E40	B40:E60
$T_a = 800\text{K}$	■	●	▲	◆
$T_a = 900\text{K}$	■	●	▲	◆
$T_a = 1000\text{K}$	□	○	△	◇

Fig.9 Effect of mixing ratio of ethanol on liquid phase penetration at each ambient temperature

に比べ、蒸発潜熱が大きいことに加え、化学構造に起因し着火に至るまでの化学反応過程が異なるため、着火に至るまでに時間を要したと考えられる。一方、雰囲気温度ごとに比較するとエタノールの混合に対し、低温雰囲気場 800K では着火遅れ期間がより長期化するが、高温雰囲気場 1000K では比較的それが短期化する。これは、雰囲気温度が上昇することで、着火性の乏しい燃料においても可燃混合気の形成が促進されるため、素早く着火に至ると考えられる。

4. 3 エタノールの混合割合に伴う混合気形態の変化が化学種生成に及ぼす影響 本節では、エタノールの混合に伴う混合気形態の変化が化学種生成挙動に及ぼす影響を調査するため、OH ラジカル、HCHO ラジカルの撮影を行った。さらに、エタノールと同等の蒸発性およびセタン価を持つイソオクタン(i-C8)をBDFに混合し(BDF:i-C8=100:0 (B100), 80:20 (B80:i20), 60:40 (B60:i40), 40:60 (B40:i60)), 化学種生成過程を比較した。図 11 にノズル先端から OH, HCHO ラジカルの上端部までの位置の時間履歴を示す。なお、上段が BDF/エタノール混合燃料、下段が BDF/i-C8 混合燃料を表す。BDF/エタノール混合燃料では、HCHO ラジカルが発現した後に OH ラジカルが発現しており、さらにエタノールの混合割合の増加に伴いその時間差は大きくなる。これに対し、BDF/i-C8 混合燃料では混合割合に関わらず HCHO ラジカルと OH ラジカルがほぼ同時期に発現する。すなわち、i-C8 混合時には低温酸化反応(以下、LTHR)後、直ぐに高温酸化反応(以下、HTHR)に移行するが、エタノール混合時こは LTHR 後、しばらく経過した後 HTHR に移行することがわかる。このことからエタノールは中間生成物を消費する特性を持っており、その原因はエーテル結合に起因し炭化水素系燃料に比べ、化学種生成挙動が異なると考えられる。前節で述べた着火時期が長期化する要因として

も着火に至るまでの化学反応論にあると考えられる。

4. 4 エタノールの混合割合の変化が着火位置に及ぼす影響

図 12 に自発光撮影時に OH ラジカルが発現した際の各画像を示す。着火位置の比較を行うため、各画像のノズル先端から OH ラジカルの上端部までの距離を着火位置と定義し、その結果を図 13 に示す。雰囲気温度に関わらず、BDF に混合するエタノールの混合割合が増加すると、着火位置は噴霧火炎の下流方向へと移行する。これは、噴霧火炎内における高沸点成分と低沸点成分の蒸気濃度分布に起因する。低沸点燃

Fig.11 Time histories of luminescence

Fig.10 Effect of mixing ratio of ethanol on ignition delay at each ambient temperature

Fig.12 Images of OH chemiluminescence

Fig.13 Effect of mixing ratio of ethanol on ignition position

料であるエタノールは、噴霧上流部から気化が始まり噴霧火炎内で比較的均一な蒸気濃度分布になると考えられる。一方、高沸点成分は気化・拡散が遅延されるため、噴霧下流部にて BDF を多量に含む蒸気濃度分布が形成される。さらに、エタノールの割合が多い燃料ほど着火遅れ期間が長期化するため、着火に至るまでに燃料噴霧がより広範囲に拡散される。これらのことから、混合するエタノールの増加に伴い、着火位置は噴霧火炎の下流部へと推移したと考えられる。

5. 結言

本報では、定容燃焼容器にて BDF とエタノールの混合燃料が噴霧、着火および燃焼特性に及ぼす影響を把握した。得られた結論を以下に示す。

- (1) BDF へのエタノール混合割合の増加に伴い、希薄な混合気形成されるが、その度合いは雰囲気温度により異なった挙動を示す。
- (2) 混合燃料の着火性は高自着火成分に依存するが、その依存度は混合する低自着火燃料の燃料組成によって変化する。
- (3) BDF に混合するエタノールの割合を変化させることで、意図的に着火時期ならびに着火位置を制御することが可能になる。

参考文献

- (1) 吉本康文, 金子和喜, 小野寺正幸, 日本機械学会論文集中(B編), 75-752, pp.279-286, (2009).
- (2) 奥井伸宜, 鈴木哲平, 千田二郎, 日本マリンエンジニア学会誌, 40-6, pp.63-69, (2005).
- (3) 吉本康文, 木下英二, 日本燃焼学会誌, 51-156, pp.121-128, (2007).
- (4) 千田二郎, 藤本元, 自動車技術会論文集, 54-5,

pp.69-75, (2000).

- (5) 羽原輝晃, 池田智樹, 千田二郎, 自動車技術会論文集, 38-2, pp.101-106, (2007).
- (6) 羽原輝晃, 池田智樹, 千田二郎, 自動車技術会論文集, 38-2, pp.107-112, (2007).
- (7) 久米秀典, 池田智樹, 桜井翔, 千田二郎, 自動車技術会論文集, 40-2, pp.481-486, (2009).
- (8) 川野大輔, 同志社大学博士論文, pp.104-112, (2002).